Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

INVESTIGAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE RESERVATÓRIO EM CONCRETO ARMADO COM REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E FORMAÇÃO DE ETRINGITA SECUNDÁRIA

M. SOLLERO
Tecnóloga em Construção Civil
CONCREMAT Engenharia e Tecnologia S.A.
São Paulo, Brasil
marcela.barros@concremat.com.br

H. BOLORINO
Química - Diretora
CONCREMAT Engenharia e Tecnologia S.A.
São Paulo, Brasil
heloisa.bolorino@concremat.com.br

RESUMO

O presente artigo apresenta um *case* sobre a investigação do quadro patológico de um reservatório de águas servidas, caracterizado por vazamentos, intensa fissuração– tipicamente decorrente de reações expansivas do concreto- e deterioração do sistema de proteção. A investigação foi baseada na inspeção visual, anamnese, revisão bibliográfica nacional e internacional, análise de projetos e realização de ensaios de determinação do potencial de corrosão, do teor de cloretos, da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade do concreto, bem como da ocorrência de reações expansivas por análise petrográfica e microscopia eletrônica de varredura, dentre outros. Constatou-se a contribuição de diversos fenômenos para a formação do quadro apresentado, sendo os principais a reação álcali-agregado (RAA), a expansão por sulfatos (DEF), a retração térmica do concreto e o limite de abertura de fissuras adotado em projeto. A partir do diagnóstico desenvolvido, foi estudado o prognóstico da estrutura e foram elaboradas recomendações de recuperação, mitigação e proteção dos elementos que compõe o reservatório. O estudo desenvolvido evidenciou o processo complexo e interdisciplinar necessário para o adequado diagnóstico das causas da degradação de uma estrutura, do qual depende o sucesso das intervenções de recuperação.
Palavras-chave: inspeção, concreto, fissuração, RAA, DEF.

ABSTRACT

This article presents a case on the research of the pathological situation of a wastewater reservoir, characterized by leaks, intense cracking – typically due to expansive concrete reactions – and deterioration of the protection system. The research was based on visual inspection, anamnesis, national and international literature review, project analysis and implementation of trials to determine the corrosion potential, chloride content, resistance to axial compression and modulus of elasticity of the concrete, as well as the occurrence of expansive reactions by petrographic analysis and scanning electron microscopy, etc.. We noted the contribution of various phenomena for the formation of the situation presented, the main ones being the alkali-aggregate reaction (AAR), sulfate attack (DEF), thermal shrinkage of concrete, and the crack-opening limit adopted in the project. Based on the diagnosis developed, we studied the prognosis of the structure and prepared recommendations for recovery, mitigation and protection from the elements that make up the reservoir. The study showed the complex and interdisciplinary process required for the proper diagnosis of the causes of degradation of a structure, which depends on the success of the recovery measures.
Keywords: inspection, concrete, cracking, AAR, DEF.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto devem atender aos requisitos de qualidade quanto aos aspectos da durabilidade, da funcionalidade e da estabilidade. No caso de reservatórios e demais estruturas destinadas à contenção de água e outros líquidos, esses requisitos podem ser interpretados como a necessidade da estrutura manter-se sem danos que comprometam sua estanqueidade, sua capacidade resistente e a segurança dos usuários diretos ou indiretos pelo tempo para o qual foi projetada - de forma geral, ao menos 50 anos [1] [2].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

O presente artigo apresenta a investigação do quadro patológico instaurado em um reservatório semienterrado de águas servidas com capacidade de armazenamento de 4300 m³, projetado em 2003 e construído em 2004. A superestrutura do reservatório é constituída por parede, laje inferior e viga superior executados em concreto armado moldado *in loco.* O reservatório possui ainda, conforme especificações de projeto, 20,0 m de diâmetro interno, altura de aproximadamente 15,1 m – sendo 1,6 m enterrados- e $f_{ck} \geq 30$ MPa. Segundo a norma ABNT NBR 6118 [3], o ambiente em que o reservatório se situa classifica-se na Classe de Agressividade III, ou seja, Forte.

A estrutura em estudo apresentava-se, no período da inspeção, intensamente fissurada e com vazamentos, conforme ilustram a Figura 1 e a Figura 2.



Figura 1: Vista geral (a) e vista parcial (b) do reservatório - 2013



Figura 2: Detalhes da fissuração na parede do reservatório. Nota-se ainda a presença de falhas na estanqueidade e a deterioração da pintura

2. HISTÓRICO

O levantamento do histórico da estrutura foi realizado através do estudo de documentos como relatórios, projetos e memória de cálculo do reservatório, bem como das informações fornecidas pelos proprietários.

Consta que os vazamentos e fissuração da estrutura foram verificados logo após a entrega da obra, em 2004. Segundo informações obtidas pelo proprietário, o reservatório foi colocado em carga – entrou em operação – com idade inferior a 28 dias e a cura provavelmente foi deficiente. Contudo, não existem registros técnicos sobre a execução da obra, como relatórios de controle tecnológico, ou sobre a impermeabilização utilizada na época.

Objetivando sanar as falhas na estanqueidade da estrutura, foi executada impermeabilização com aplicação de manta asfáltica, cuja ineficiência foi comprovada pelos vazamentos apresentados pela estrutura desde então. Foi informado ainda que a manta asfáltica provavelmente não se apresenta adequadamente aderida ao substrato, no interior do

reservatório, pois o mesmo se encontrava úmido durante a sua aplicação. Desde então, o reservatório não foi esvaziado para inspeção ou manutenção.

Posteriormente, em 2009, o reservatório foi alvo de uma inspeção que avaliou as manifestações patológicas presentes na estrutura e recomendou a substituição do sistema de impermeabilização. A Figura 3 e a Figura 4 apresentam o reservatório em 2009, 05 anos após sua construção.



Figura 3: Vista geral (a) e vista parcial (b) do reservatório – 2009



Figura 4: Detalhes da parede do reservatório apresentando fissuração e percolação de água

No ano seguinte, em 2010, o reservatório recebeu pintura externa, sendo aplicados um primer à base de epóxi e revestimento de poliuretano (sistema de proteção impermeabilizante).

Dado o estado de degradação do reservatório e a constatação de reação álcali-agregado (RAA) em outras estruturas do mesmo complexo, foi realizada nova inspeção tátil-visual em abril de 2013, a qual observou, além das anomalias indicadas anteriormente, o estufamento do revestimento em função do acúmulo de água entre a pintura impermeabilizante e o reservatório. Observou-se ainda a ausência de pontos de concreto disgregado ou com som cavo, em um exame preliminar. A conformação das fissuras e a exsudação de material esbranquiçado, podendo ser resultante da lixiviação dos sais do concreto ou de reações expansivas do material, levaram ao desenvolvimento de um estudo mais detalhado, no qual se baseia o presente artigo.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Os itens 3.1 a 3.3 apresentam um resumo da revisão bibliográfica realizada, focado nos principais conhecimentos necessários para a adequada compreensão do quadro patológico diagnosticado no reservatório.

3.1. Retração do concreto

A retração do concreto em seu estado plástico ou endurecido, especialmente nas primeiras idades, pode gerar fissuração linear ou mapeada [4] [5]. Os itens 3.1.1. a 3.1.3 diferenciam a retração hidráulica, por secagem e térmica, principais formas desse fenômeno.

3.1.1. Retração hidráulica do concreto

A retração hidráulica do concreto decorre da variação volumétrica induzida pela perda de água do concreto durante seu endurecimento e das restrições impostas pela ligação com outros elementos ou pelas próprias armaduras. Se a tensão gerada por essa interação é superior à resistência à tração do concreto, são ocasionadas fissuras lineares e geralmente paralelas. [5].

Destaca-se que a norma ACI 224.1R-07 [5] classifica a reação autógena, caracterizada pela auto -dessecação do concreto com relação água cimento abaixo de 0,42, como um tipo de retração hidráulica.

3.1.2. Retração por secagem do concreto

A retração por secagem do concreto, que pode ser considerada um tipo de retração hidráulica, ocorre quando a camada superficial do elemento sofre uma secagem enérgica nas primeiras horas após sua execução – geralmente, por deficiência no processo de cura-, gerando fissuração com conformação mapeada e de pouca profundidade [4] [5]. A ocorrência e a frequência da retração por secagem são influenciadas pela relação água/ cimento, pelo tipo cimento e pelas condições ambientais, dentre outros fatores [4].

3.1.3. Retração térmica do concreto

As fissuras por retração térmica do concreto ocorrem através de dois processos: expansão seguida de retração ou retração diferencial, como explica Cánovas [4].

Parte-se do princípio que as reações de hidratação do cimento são exotérmicas, isto é, produzem calor. A quantidade de calor produzida é definida pelo calor de hidratação dos materiais utilizados, pela dosagem aplicada e pelo volume da concretagem; a temperatura atingida pelo concreto relaciona-se à quantidade de calor produzida e à temperatura ambiente. Em função da elevação da temperatura, o concreto se expande, ainda em estado plástico. Dado que o material possui condutibilidade térmica baixa, resfria-se de forma lenta. A etapa de resfriamento do concreto até que seja alcançado o equilíbrio com a temperatura ambiente usualmente ocorre quando o material já se encontra endurecido, mas sem resistência à tração –e, portanto, à fissuração – suficiente para absorver os esforços gerados pelas variações volumétricas.

As fissuras formadas por esse processo frequentemente são profundas e possuem conformação linear ou mapeada, influenciadas pelo momento em que ocorreram, pela intensidade da retração, pelo módulo de elasticidade, pela distribuição e pela taxa de armaduras no concreto.

No caso da retração diferencial, há a formação de gradientes térmicos elevados entre as camadas mais profundas e mais superficiais de elementos de grandes dimensões. Como consequência, ocorrem o resfriamento e a retração diferencial entre as diversas profundidades concretadas. Ao ultrapassar a resistência à tração do concreto, a retração produz fissuras distribuídas de forma comumente reticular e que evoluem até o atingimento do equilíbrio térmico, o qual pode se estender por longos períodos, penetrando mais profundamente nos elementos [4] [5].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

3.2. Reações expansivas do concreto

As reações expansivas do concreto causam efeitos deletérios a partir do momento em que os esforços gerados causam efeitos como fissurações, lascamentos, pipocamentos e deformações, dentre outros. Tais reações podem decorrer do ataque por sulfatos, da reação álcali-agregado e da hidratação tardia de CaO e Mg livres. Os itens 3.2.1 e 3.2.2 expõe brevemente os mecanismos de expansão do concreto em função do ataque por sulfatos e da reação álcali-agregado.

3.2.1. Expansão do concreto por sulfatos

O ataque por sulfatos pode decorrer de uma fonte externa, como o contato com água contaminada, ou interna, quando foi utilizado material com excesso de sulfatos na confecção do concreto ou há formação de gipsita ou etringita secundária ou tardia (DEF).

A etringita, componente formado durante a hidratação do concreto, perde estabilidade a partir de aproximadamente 65 ºC, decompondo-se em monosulfato hidratado; os íons sulfato liberados nesse processo são adsorvidos pelo silicato de cálcio hidratado. Posteriormente, com o concreto endurecido, o contato com umidade pode dissolver os íons sulfatos, causando a formação tardia de etringita, material de aparência esbranquiçada e cristalina quando visto a olho nu.

O crescimento dos cristais gera tensões, bem como a adsorção de água em meio alcalino por uma etringita pouco cristalina, segundo as hipóteses mais comumente aceitas pelo meio acadêmico. As tensões geradas pela expansão, por sua vez, geram a fissuração do concreto. Como as fissuras abrem caminho para a penetração de mais umidade, a reação tende a ser continuamente acelerada na ausência de intervenções [6].

3.2.2. Reação álcali-agregado

A reação entre minerais reativos dos agregados, os álcalis e os íons hidroxila da pasta de cimento resulta na formação de géis silicatos alcalinos, dependendo da desordem na estrutura cristalina dos agregados, da porosidade e da dimensão das partículas. O ataque no concreto é baseado na depolimerização da estrutura de sílica e pela adsorção de íons metálicos nas superfícies dos produtos de reação, indicam Mehta e Monteiro [6].

O gel absorve água por osmose e expande-se, criando pressão equivalente a até 4 MPa no interior do concreto – se o grau de restrição é baixo, a pressão implica na expansão e fissuração do concreto, podendo eventualmente chegar a um ponto em que a estrutura se apresente completamente deteriorada [5] [6] [7]. Com base nesse princípio, uma das soluções de mitigação dos efeitos da RAA mais utilizadas é o confinamento dos elementos, aplicando tensões de compressão ao concreto.

A configuração típica das fissuras geradas por RAA é mapeada, podendo ser direcionada pelas armaduras, formando um traçado com linhas paralelas a ela. Além da fissuração, a reação álcali-agregado pode causar a exsudação de gel, pipocamentos, deformações, descoloração, redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, dentre outros itens [7].

A norma ABNT NBR 15577-1 [8] subdivide a reação álcali-agregado em álcali-sílica, álcali-silicato – um tipo de reação álcali-sílica - e álcali-carbonato.

A norma ACI 201-2R-08 [9] subdivide a reação álcali-sílica em duas categorias: uma com reações envolvendo materiais silicosos pouco cristalinos ou metaestáveis e uma com reações envolvendo certas variedades de quartzo. No primeiro tipo, a expansão e a fissuração usualmente se tornam visível entre 05 e 10 anos após a construção; no segundo tipo, as manifestações da reação levam mais tempo para se tornar aparentes e a mesma pode se prolongar por muitas décadas.

3.3. Limite de abertura de fissuras

A fissuração de elementos de concreto armado é tida como inevitável, dadas as características próprias do material [3]. Contudo, a fissuração do concreto pode implicar em prejuízos estéticos, à durabilidade e à segurança das estruturas, à sensação de segurança por parte dos usuários - aceitabilidade sensorial - e a funcionalidade dos elementos, no caso de estruturas cuja estanqueidade é um requisito. Com o propósito de obter um bom desempenho em relação a esses aspectos, normas nacionais e internacionais buscam definir limites máximos para a abertura de fissuras, a serem incorporados ao projeto da estrutura.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Desde sua revisão publicada em 2003, pouco após o término do projeto do reservatório, a norma ABNT NBR 6118:2014 [3] define limites máximos para a abertura de fissura em estruturas de concreto em função da Classe de Agressividade Ambiental, objetivando a proteção das armaduras quanto à corrosão. Para estruturas de concreto armado em ambiente com Classe de Agressividade Ambiental III, como o reservatório em estudo, a abertura máxima de fissuras recomendada é de 0,3 mm. Apesar de destacar que esse limite deve ser encarado apenas como um critério para o adequado projeto de estruturas e que as aberturas de fissuras reais podem eventualmente ultrapassar o valor de referência, a norma também afirma que no caso de reservatórios devem ser adotados limites de abertura menores de forma a preservar sua estanqueidade. Em sua versão que estava em vigor no início do projeto do reservatório, a norma ABNT NBR 6118 1980 [10] definia o limite de abertura como 0,1 mm para estruturas não protegidas em meio agressivo e como 0,3 mm para estruturas protegidas. É usual ainda a adoção do limite de abertura de fissuras de 0,15 mm em reservatórios, tal como apresentado por Guimarães [11].

A norma americana ACI 224-R01 [12] indica, como limite de abertura razoável de fissuras em estruturas destinadas à contenção de água, o valor de 0,1 mm. O documento afirma que é esperado que uma parcela das fissuras da estrutura exceda esse valor, devendo-se utilizar esse valor apenas como uma referência, mas destaca a necessidade de se adotar limites de abertura de fissuras mais restritivos em estruturas cujo contato com umidade é constante ou em que vazamentos são preocupantes.

A norma britânica BS 8007:1987 [13], voltada para o projeto de estruturas para contenção de líquidos, determina o valor máximo de 0,2 mm para a abertura de fissuras em elementos com exposição severa ou muito severa. A norma foi substituída pela Eurocode [14] em 2006, o qual adota uma classificação um pouco mais complexa, que relaciona a abertura das fissuras à espessura das paredes e a pressão hidrostática, mas limita a abertura máxima a 0,2 mm em estruturas nas quais os vazamentos devem ser limitados ou não permitidos. Com esse valor, espera-se que a fissura seja selada naturalmente pela cristalização dos sais do concreto em pouco tempo, preservando a estanqueidade da estrutura.

4. METODOLOGIA

A investigação do quadro patológico foi estruturada nas etapas a seguir:

a) Levantamento do histórico da estrutura/ anamnese;
b) Inspeção visual e cadastramento de anomalias;
c) Realização de ensaios *in loco* e coleta de amostras para ensaios laboratoriais;
d) Revisão bibliográfica nacional e internacional;
e) Análise dos dados obtidos;
f) Elaboração de diagnóstico, prognóstico e proposta de terapia.

Ressalta-se que, em decorrência de questões logísticas, não foi possível esvaziar o reservatório e, portanto, sua área interna não foi inspecionada.

Os ensaios e análises foram realizados por equipes multidisciplinares, formadas por engenheiros civis, geólogos, tecnólogos em construção civil e químicos.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos através da inspeção visual e dos ensaios realizados são apresentados nos itens 5.1, 5.2 e 5.3.

5.1. Inspeção visual

Através da inspeção visual, verificou-se que estrutura apresenta um quadro de fissuração generalizado na parede do reservatório, com percolação de água, eflorescências e concreções. As fissuras possuem abertura máxima de 0,5 mm. Na face Superior da viga, verificou-se a ocorrência de fissuras transversais com distribuição sistemática.

Constatou-se a presença de pontos de concreto segregado sob o revestimento, como indica a Figura 5.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 5: Ponto de concreto segregado visualizado após remoção parcial do revestimento

É necessário destacar que a presença de manchas avermelhadas em pontos afetados por infiltrações não foi considerada indicativa da presença de óxidos e da corrosão das armaduras embutidas dada ser essa a mesma coloração das águas servidas armazenadas no reservatório. A estrutura não apresenta evidências da corrosão das armaduras, como a disgregação do concreto. Para confirmação, foi realizada a prospecção das armaduras em pontos distribuídos ao longo da parede. Em todos as regiões analisadas, a armadura se apresentava em boas condições, conforme ilustra a Figura 6.



Figura 6: Detalhe da armadura embutida no concreto

Verificou-se ainda a retenção de água entre a superfície das paredes e o revestimento impermeabilizante à base de epóxi e poliuretano, situação responsável pela formação de bolhas e por seu estufamento. A Figura 7, em que se observa a percolação de água após a perfuração do revestimento, ilustra a afirmação.



Figura 7: Detalhe da parede imediatamente antes (a) e após o início da perfuração (b), momento em que se observa a percolação de água retida entre o revestimento e a estrutura

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A área interna do reservatório não pode ser inspecionada, dada a inviabilidade logística de esvaziamento do mesmo. A Figura 8 apresenta, no entanto, o detalhe do término da impermeabilização no interior da estrutura.



Figura 8: Término da impermeabilização interna aproximadamente 60 cm abaixo do topo da estrutura. Observa-se ainda a coloração da água

5.2. Ensaios tecnológicos

Os ensaios e a coleta de amostras foram realizados de forma distribuída ao longo da parede do reservatório, que teve sua altura e seu comprimento divididos em 03 partes cada, delimitando 09 quadrantes. Ressalta-se que, com exceção dos testemunhos destinados à determinação de reações expansivas do concreto, os ensaios e coleta de amostras foram realizados em trechos sem anomalias visualmente identificáveis.

Os resultados dos ensaios tecnológicos são resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios tecnológicos

Ensaio	Pontos de ensaio	Resultados
Determinação da espessura de cobrimento das armaduras por indução magnética (pacometria)	110 (11 malhas)	96,4% dos pontos analisados apresentaram-se de acordo com as especificações de projeto e da norma atualmente vigente (4 cm) [17]
Determinação da profundidade de carbonatação do concreto	6	100% dos pontos analisados apresentaram-se sem frente de carbonatação
Determinação do potencial elétrico de corrosão das armaduras	5	100% dos pontos analisados apresentaram probabilidade de corrosão menos que 10% de acordo com os parâmetros de Cánovas [4]
Determinação do teor de cloretos em relação à massa de cimento	4	100% dos pontos apresentaram teor de cloretos dentro dos limites normativos vigentes à época da inspeção [15], variando de 0,01 a 0,02%
Determinação da absorção de água por imersão e fervura	2	100% das amostras apresentam qualidade e absorção média de acordo com os parâmetros do CEB-FIB [16]
Determinação do índice de vazios após saturação e fervura	2	100% das amostras apresentam boa qualidade e compacidade com os parâmetros do CEB-FIB [[**16**]
Determinação da resistência à compressão axial do concreto	7	100% das amostras apresentam resistência superior à especificação de projeto (30 MPa), variando de 43,1 a 70,5 MPa (resistência média de 58,2 ± 9,2 MPa)
Determinação do módulo de elasticidade	3	O módulo de elasticidade secante efetivo apresentou-se 5% menor do que o módulo estimado de acordo com as especificações da ABNT NBR 6118 [17]

Ensaio	Pontos de ensaio	Resultados
Caracterização de reações expansivas (microscopia estereoscópica, óptica e eletrônica de varredura)	2	Bordas de reação visíveis a olho nu; Deposição de material esbranquiçado na superfície de descolamento do agregado; Agregado graúdo potencialmente reativo, favorecendo a ocorrência de reação álcali-silicato; Presença de quartzo com extinção ondulante e quartzo microgranular localmente recristalizado no agregado graúdo; Presença de cristais aciculares de etringita nos poros do concreto; Grande quantidade de gel típico de RAA e etringita; Presença de gel gretado na interface pasta/ agregado e de cristais foliares sobre a superfície de quebra dos agregados graúdos.
Análise química da água contida no reservatório	-	pH *in natura* a 34ºC de 8,2 2,77 mg/L de magnésio total 1,28 mg/L de sulfatos

5.3. Abertura de fissuras

Segundo Guimarães [11], para garantir a estanqueidade de reservatórios de concreto armado deve-se limitar a abertura limite de fissuras (w_k) em 0,15 mm, sob a combinação de ações de carregamento quase permanentes. Através da revisão bibliográfica, verificou-se a presença de limites de abertura de 0,1 a 0,2 mm em normas internacionais.

A memória de cálculo e os demais documentos de referência da estrutura não apresentavam registros de verificações das aberturas de fissuras. Dessa forma, para complementar a avaliação da estrutura, optou-se por calcular a abertura de fissuras com base nas informações fornecidas pela memória de cálculo e pelos projetos.

A memória de cálculo apresentava apenas as solicitações de cálculo (N_d) para verificação do Estado Limite Último (ELU), mas a verificação da abertura de fissuras deve ser calculada para o Estado Limite de Serviço (ELS). Sendo assim, partiu-se da premissa de que os coeficientes de ponderação (γ_g e γ_q) foram adotados iguais a 1,4 e obteve-se a solicitação de serviço ($N_{d,serv.}$) dividindo o valor de N_d por 1,4.

Foram calculadas as aberturas de fissuras para os cinco níveis de esforços apresentados na memória de cálculo. Tendo em vista que as primeiras fissuras surgiram durante a colocação do reservatório em serviço, foi considerado o f_{ck} de projeto na verificação da abertura das fissuras.

Os valores de aberturas de fissuras foram calculados de acordo com a Equação 1, especificada pela NBR 6118:2007 [17].

$$wk = \frac{\phi_i}{12{,}5\eta_1} \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}} \quad (1)$$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do cálculo da abertura de fissuras w_k

Nível (m)	w_k (mm)
0 @ 3	0,28
4 @ 5	0,26
6 @ 8	0,47
8 @ 13	0,29

Nota-se que o valor da abertura de fissuras chega até a 0,47 mm, superando os limites máximos normativos de 0,2 mm.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Verificou-se que o reservatório foi projetado de forma que o concreto possuísse resistência mecânica e cobrimento de armaduras adequados às condições ambientais e de serviço, no que se refere ao parâmetro da durabilidade.

De fato, observou-se que a estrutura não apresenta indícios de corrosão das armaduras embutidas, como indicam a inspeção visual e o ensaio de determinação do potencial de corrosão elétrico das armaduras. Observou-se também que o concreto não apresenta frente de carbonatação e presença significativa de cloretos.

O bom estado das armaduras pode ter sido influenciado, curiosamente, pela marcante infiltração de água sofrida pela estrutura e pela presença da pintura impermeabilizante, que encapsulou o concreto em um bolsão de umidade, dificultando ou impedindo a penetração de oxigênio, essencial para as reações de oxidação de armadura. No que se refere a esse fenômeno, destaca-se que a umidade ótima para a corrosão das armaduras situa-se entre 70 e 80% [18].

A passagem de água pelo concreto, no entanto, favorece a expansão do concreto em função da reação álcali-agregado e da formação de etringita secundária. Ambas as reações expansivas, confirmadas através dos ensaios, necessitam da umidade para seu desenvolvimento ao longo do tempo.

A fissuração do concreto em função da reação álcali-agregado é, geralmente, lenta e de início tardio. De acordo com a norma ACI 201-2 [9], é esperado que a fissuração e os demais efeitos da reação álcali-sílica – o que abrange a reação álcali-silicato, para o propósito dessa análise –envolvendo certas variedades de quartzo, caso verificado nas amostras extraídas no reservatório, desenvolvam-se em tempo superior a 05 ou 10 anos e se estenda por muitas décadas. Dessa forma, é possível que a fissuração atual do reservatório não seja decorrente dessa reação, mas que os danos oriundos dela se façam visíveis nos próximos anos.

O quadro fissuratório visualizado, com fissuras mapeadas e paralelas às armaduras, deve-se provavelmente à combinação dos esforços de tração oriundos da utilização precoce do reservatório e das particularidades do cálculo da estrutura com a retração do concreto. A elevada resistência à compressão do concreto é provavelmente relacionada a um alto consumo de cimento - quanto maior o consumo de cimento, maiores os gradientes de temperatura alcançados durante as idades iniciais do concreto e maior a retração sofrida pelo material, provocando fissuração. Destaca-se que, apesar do $f_{ck} \leq 30$ MPa especificado em projeto, a resistência média da estrutura foi de 58,2 ± 9,2 MPa e houveram pontos em que a mesma atingiu até 70,5 MPa. Se forem considerados os coeficientes de correção indicados pela norma ABNT NBR 7680-1 [19], que entrou em vigor posteriormente às análises realizadas, a resistência média passa a 66,3 ± 10,2 MPa e a resistência máxima atinge consideráveis 79,9 MPa. Como abordado anteriormente, não há registros técnicos sobre a execução da obra, como relatórios de controle tecnológico ou de dosagem, que possam esclarecer a opção por um traço com uma resistência tão superior aos 30 MPa utilizados no cálculo da estrutura. No entanto, a mesma pode estar relacionada à colocação do reservatório em carga antes dos 28 dias.

Caso a temperatura do concreto ultrapasse a temperatura de aproximadamente 65 ºC durante a ocorrência das reações de hidratação, há ainda a possibilidade de retardar a formação de etringita, um dos componentes do concreto. Como consequência, a formação e a expansão da etringita, que dependem da umidade do meio, podem acontecer com o concreto endurecido, provocando fissuração e a exsudação de material esbranquiçado, de forma semelhante à RAA. Apesar do baixo teor de sulfatos na água constatado através da análise química, a etringita secundária verificada nas amostras provavelmente decorre também do aporte de sulfatos, sugerindo que a composição das águas servidas armazenadas na estrutura foi alterada em algum momento desde que a estrutura foi posta em serviço.

A contribuição da retração hidráulica e da retração por secagem do concreto na fissuração do reservatório devem ser consideradas, em função da cura deficiente da estrutura, agravada pelas temperaturas razoavelmente elevadas da região

A segregação do concreto visualizada decorre de falhas na vibração e no adensamento do material. Tal processo pode ter sido dificultado pela reduzida trabalhabilidade do material, influenciada também pelo traço do concreto e pela temperatura do material e do ambiente.

Os testemunhos utilizados nos ensaios de determinação da resistência à compressão, do módulo de elasticidade do concreto, da absorção e do índice de vazios foram extraídos de regiões sem anomalias visíveis. Nota-se que os mesmos apresentam qualidade média no que se refere à absorção e boa ao índice de vazios, sendo que a percolação de água se dá

principalmente através das fissuras. Nota-se ainda que as reações expansivas não afetaram o módulo de elasticidade da estrutura.

Os bons resultados obtidos nos ensaios dessas amostras, se avaliados junto às manifestações patológicas observadas, destacam o controle tecnológico deficiente durante a execução da estrutura.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que uma estrutura de concreto cumpra adequadamente as funções para as quais foi projetada, é necessário que atenda a parâmetros de desempenho pré-estabelecidos. No caso de reservatórios, esses parâmetros incluem a segurança estrutural, a durabilidade e a estanqueidade.

Como apresentado, o reservatório em estudo apresenta anomalias que comprometem sua funcionalidade, dado que o mesmo não se apresenta estanque, e sua durabilidade, mesmo que as armaduras apresentem-se sãs atualmente. A ocorrência de reações expansivas é particularmente preocupante, dada sua tendência evolutiva e seus efeitos fortemente deletérios.

Constatou-se a contribuição de diversos fenômenos para a formação do quadro patológico apresentado, decorrentes da seleção dos materiais utilizados, da execução da obra, do próprio projeto da estrutura e da intervenção de manutenção realizada.

A necessidade da realização de intervenções de manutenção corretiva e preventiva, nesse caso, é premente – caso as mesmas não sejam realizadas, a degradação do sistema de proteção impermeabilizante evoluirá; a contínua passagem de água através da estrutura propicia a lixiviação dos sais solúveis do concreto para o exterior dos elementos, onde se acumulam na forma de eflorescências e concreções. Como consequência, o concreto perde massa, tornando-se mais poroso e menos resistente, e seu pH é reduzido, podendo chegar ao ponto de despassivar as armaduras. Nessas condições, caso o teor de umidade do concreto se torne inferior ou próximo a 80%, as armaduras embutidas podem entrar em processo de corrosão. Adicionalmente, a fissuração do reservatório será intensificada pelas reações expansivas, podendo afetar as propriedades mecânicas da estrutura e a aderência entre as barras e o concreto, além de comprometer ainda mais sua estanqueidade.

Atualmente, não há um tratamento que sane de forma segura e definitiva a reação álcali-agregado. Para mitigá-la, no entanto, podem ser tomadas medidas como a redução da umidade do concreto. É importante salientar que não é viável interromper completamente o contato da estrutura com água, pois parte da mesma encontra-se retida no interior dos elementos e a laje inferior está sujeita à infiltração por capilaridade da umidade presente no solo.

A água é essencial não apenas para o desenvolvimento da RAA, mas também para a expansão dos sulfatos e da corrosão das armaduras. É esperado que o desenvolvimento das reações expansivas gere tensões de tração significativas, as quais podem ser combatidas através de confinamentos externos das estruturas. Para a avaliação da necessidade dos mesmos, que possuem custo elevado, e seu dimensionamento, é interessante o uso de ensaios acelerados de determinação da expansão residual do concreto, desenvolvidos ao longo de ao menos 01 ano.

É essencial ainda a limpeza da estrutura, a substituição da impermeabilização interna, o tratamento das fissuras através de injeção, colmatação e/ ou cristalização e a substituição do sistema de proteção da face externa por um sistema que seja aberto à difusão do vapor, permitindo a redução da umidade no interior dos elementos e desacelerando as reações expansivas.

Uma vez que a fissuração apresentada pelo reservatório no momento da inspeção não se deve às reações expansivas do concreto, de forma geral, mas que as mesmas podem gerar graves problemas nos anos futuros, é importante que a estrutura seja monitorada e inspecionada periodicamente.

O reservatório em análise possui uma combinação de fatores deletérios incomum, apresentando degradação avançada apesar de sua pouca idade. Considera-se que o mesmo deve ser considerado um grande exemplo da necessidade da integração entre as equipes de projeto e execução, da necessidade de se manter registros detalhados das etapas executivas e, principalmente, da adoção de boas práticas de projeto, dosagem e execução das estruturas de concreto.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

O conhecimento de tecnologistas e patologistas do concreto experientes e em contínuo processo de atualização é fundamental para que falhas semelhantes sejam evitadas, bem como a quebra de paradigmas, como o que confunde o concreto de alta resistência com o concreto de alto desempenho, sem distinções. Sendo assim, são utilizados traços que possuem resistência à compressão alta, mas com as demais propriedades deficientes.

O desempenho do concreto deve ser encarado de forma global, focado nas características desejadas para a estrutura – elevada durabilidade, estanqueidade, alta trabalhabilidade ou resistência mecânica elevada, por exemplo-, definidas em conjunto pelos proprietários ou usuários e pelos projetistas, em acordo com os responsáveis pela execução.

É de grande importância considerar que, ainda que seja especificado um concreto de alta qualidade, é essencial que os projetos, o controle de qualidade e as técnicas de construção estejam a sua altura, incorporando corretos procedimentos de mistura, adensamento, cura e manutenção, dentre outros, evitando que uma dosagem bem realizada seja comprometida por uma produção ou execução falhas [20].

Por fim, no que se refere ao diagnóstico, ao prognóstico e a especificação da terapia para estruturas afetadas por manifestações patológicas, ressalta-se a importância do conhecimento do histórico da estrutura e da realização de análises mais aprofundadas, fundamentadas na análise de bibliografia, de projetos e ensaios, que permitam evitar visões simplistas e detectar problemas potencialmente graves, como a ocorrência de reações expansivas, em suas fases iniciais. Como consequência, tem-se a possibilidade de intervenções de menor custo e complexidade, reduzindo o impacto operacional para o proprietário e o ônus para a sociedade.

8. REFERÊNCIAS

[1] European Standards. *EN 1990:2002*. Eurocode – Basis of structural design. 2002, 119 p.
[2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 8681*. Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. 2004, 18 p.
[3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118*. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 2014, 238 p.
[4] Cánovas, M. F. *Patologia e terapia do concreto armado*. Ed. Pini. 1988.
[5] American Concrete Institute. *ACI 224.1R-07*. Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structure. 2001, 26 p.
[6] Mehta, P.K.; Monteiro, P.J.M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais*. 3ª. ed. 2008 p. 674.
[7] American Concrete Institute. *ACI 221.1R-98*. State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity. 1998, 31 p.
[8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 15577*-1. Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. 2008, 11 p.
[9] American Concrete Institute. *ACI 201.2R-08*. Guide to durable concrete. 2008, 53 p.
[10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118*. Projeto e execução de obras de concreto armado. 1980, 53 p.
[11] Guimarães, A. E. P. *Indicações para projeto e execução de reservatórios cilíndricos em concreto armado*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 1995, 184 p.
[12] American Concrete Institute. *ACI 224R-01*. Control of cracking in concrete structures. 2001, 46 p.
[13] British Standards Institution. *BS 8007:1987*. Design of concrete structures for retaining aqueous liquids. 1987, 30 p.
[14] European Standards. *EN 1992-3:2006*. Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 3: Liquid retaining and containment structures, 2006, 25 p.
[15] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 12655*. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. 2015, 23 p.
[16] Comité Euro-International du Béton. *Diagnosis and assessment of concrete structures - State-of-art report*. CEB Bull 1989.
[17] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118*. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 2007, 238 p.
[18] Neville, A. M. *Propriedades do concreto*. Ed. Bookman. 2016, 912 p.
[19] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7680-1*. Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. 2015, 27 p.
[20] Helene, P.; Isaia, G.C.; Tutikian, B.F. "Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho". *In*: __ Geraldo Cechella Isaia (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Volume II. Ed. IBRACON, 2011.